文章编号:1000-4939(2023)02-0259-05

基于模型试验的水面飞行器抗浪性分析方法

黄淼,吴彬,刘涛,李成华

(中国特种飞行器研究所,448035 荆门)

摘　要:为了在研制阶段评估某大型水陆两栖飞机的抗浪性,开展了缩比模型水池试验方法研究,定量分析了水池试验模型与实机之间气动升力/阻力系数的差异,研制了恒力装置,利用该装置可将试验模型气动升力系数补偿到与实机一致的水平。在此基础上开展了缩比模型在不同波高、波长及速度条件下的水池拖曳试验,得到了试验模型俯仰角、升沉响应特性,研究了谱分析法和线性缩比法对实机抗浪性预报的适用范围和优缺点。结果表明:谱分析法在速度小于 90 km/h 时预报结果较为合理,中高速的预报结果与实机运动现象有明显差异;线性缩比法适用速度范围涵盖从低速到离水起飞,但仅能用于定性分析波长、速度对运动响应的影响,定量分析的准确性还有待验证。

关键词:水面飞行器;抗浪性;俯仰角;垂向升沉

中图分类号:V271.5　　**文献标志码**:A　　**DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2023.02.003

The seakeeping performance analysis method for amphibian based on scaled model tank test

HUANG Miao, WU Bin, LIU Tao, LI Chenghua

(China Special Vehicle Research Institute, 448035 Jingmen, China)

Abstract: In order to investigate the seakeeping performance of amphibian, the scaled model tank test method is studied. The difference of aerodynamic lift and drag between the model and amphibian is analyzed quantitatively, and a kind of constant force mechanism used to compensate air lift to the model is developed, it can modify the aerodynamic lift of model to the same as that of the aircarft. Combined with the model test, the application range, davantages and disadvantages of spectral analysis and linear reduction method used to forecast amphibian performance is analyzed. The results show that spectral analysis is an effective way only when speed lies below 90 km/h, the forecasted result at higher speed differences from the actual situation. Linear reduction method could be used at a whole range speed and could be used to analyze the influence of wave length and speed on motion response qualitatively, but the quantitative analysis needs further examining.

Key words: amphibian; seakeeping performance; pitching angle; heaving

收稿日期:2022-03-27　　**修回日期**:2022-06-07
基金项目:工信部民用飞机专项科研资助项目(No. MJ-2017-F-03)
通信作者:黄淼,高级工程师。E-mail:huangm003@avic.com
引用格式:黄淼,吴彬,刘涛,等. 基于模型试验的水面飞行器抗浪性分析方法[J]. 应用力学学报,2023,40(2):259-263.
HUANG Miao, WU Bin, LIU Tao, et al. The seakeeping performance analysis method for amphibian based on scaled model tank test[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(2):259-263.

水面飞行器的抗浪能力是指飞机在波浪上运动时的水阻力、运动稳定性、喷溅特性、载荷响应的综合性能[1]。水面飞行器在海面上运动时一般选择迎浪或者顺浪的方向运动,以避免波浪对飞机的横航向运动产生干扰,此时飞机的俯仰角和垂向升沉响应特征是影响飞机运动稳定性的关键因素,俯仰角波动太大会使飞机的运动响应发散,并超出运动稳定边界,也会对飞行员的操纵能力造成影响[2],致使飞行员操纵困难或诱发误操作。因此,在水面飞行器研制阶段必须通过研究掌握飞机在波浪水面上的运动响应特性,其中,开展缩比模型水池拖曳试验是一种有效的研究方法。国内依托某大型水陆两栖飞机的研制,开展了缩比模型水池试验技术研究,对飞机在波浪水面中的运动、载荷进行了研究[3-5]。文献[6]研究了某大型水陆两栖飞机以 1∶8.5 缩比的模型水池规则波试验,得到了模型的运动响应规律,这种试验方法以傅汝德数相似(惯性力相似)为基础,并未考虑到模型缩比效应带来的雷诺数不相似问题,试验模型的雷诺数比实机的雷诺数低 1 ~2 个量级,使得试验模型与实机之间的气动力系数有较大差异。根据文献[7],采用大相对厚度翼型的运输类飞机,当雷诺数相差 1 个量级时翼型气动力系数差异最大值在 15% 左右。图 1 和图 2 所示为某大型水陆两栖飞机水池试验模型与风洞试验模型气动升力系数和阻力系数的差异,飞机在水面的滑行姿态一般处在 4° ~8°范围内,此时水池试验模型的气动升力系数比实机偏低 14% ~24% 、气动阻力系数偏高 40% ,气动阻力系数的差异对俯仰和垂向升沉运动响应的影响较小,且在后期数据处理时可以分离出气动阻力和水阻力从而进行处理。

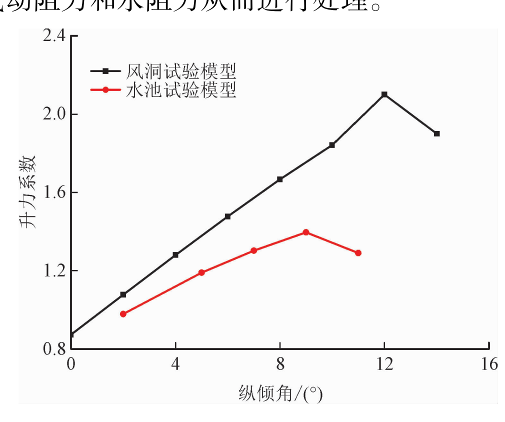


图 1 气动升力系数对比

Fig. 1 Comparison of lift coefficient

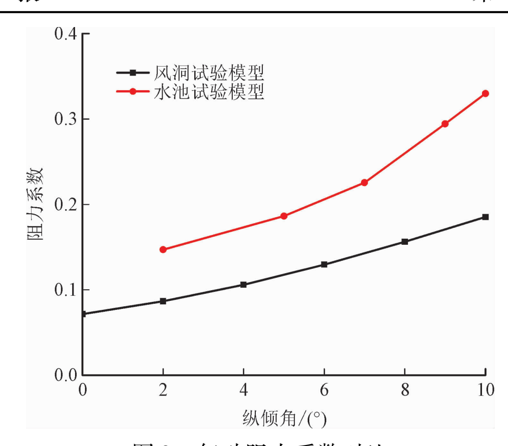


图 2 气动阻力系数对比

Fig. 2 Comparison of drag coefficient

但气动升力系数偏低使得模型受到的升力比理论上的升力小,引起模型与水面相互作用的有效重量增大,使模型运动响应与实机产生偏离。在某大型水陆两栖飞机研制中,研究人员提出了一种基于气动力修正的试验方法,对模型的气动升力进行补偿,并模拟到与实机一致的气动力状态。

1 基于气动力修正的模型水池拖曳试验

图 3 所示为某大型水陆两栖飞机详细设计阶段使用的模型水池拖曳试验方法[8]。该试验方法在参考文献[6]试验方法的基础上进行了改进,其核心变化在于升沉杆上方连接的恒力装置[9]。

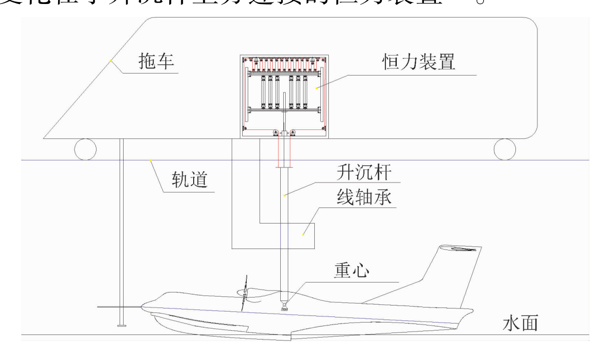


图 3 基于气动力修正的水池拖曳试验方法

Fig. 3 Tank model test method based on aerodynamic correction

恒力装置的原理是利用动滑轮组、定滑轮组、弹簧和拉绳提供恒定的、持续的、可调节的拉力,该拉力通过升沉杆施加给试验模型,实现对模型气动升力系数偏低引起的气动升力差异的补偿,从而将试验模型受到的气动升力模拟到理论值附近。恒力装置具有持续输出拉力的能力,当试验模型在垂向出现跳动时,恒力装置动滑轮组、弹簧和拉力绳随着试验模型出现一定微量的运动,保持拉力绳始终处于

拉紧的状态，从而输出恒定、持续的拉力。与参考文献[6]相比，该试验方法取消了小滑车和前后弹簧，而是采用与拖车固接的线轴承，避免了试验过程中模型出现前后窜动的现象。

开展试验前，首先在拖曳水池环境下测量试验模型在一系列攻角下的气动升力，换算出升力系数曲线，并与实机的升力系数进行对比，计算得到试验模型气动升力系数与实机气动升力系数的差值。试验时，根据试验速度、模型机翼面积和气动升力系数差值计算气动升力的差异，并调节恒力装置拉力至气动升力差异值，然后启动拖车完成试验，采集试验模型在波浪水面上匀速运动过程中的水阻力、俯仰角、垂向升沉和驾驶舱位置、重心位置的过载响应，直至完成所有状态的试验。

2　基于谱分析法的抗浪性分析

海浪是一种自然现象，每个波的波高、波长和周期都是随机变化的，很难用确切的函数来描述，但海浪的基本规律是存在的。经验表明在波高不大的情况下可以把海浪看成平稳的随机过程[10]，可以利用统计学的方法，将复杂的海浪看成一系列不同波长、不同周期和相位随机的微幅单元波的叠加。因此在数学上可以用海浪谱来描述海浪的能量在不同频率单元波上的分布情况，并发展起了单参数谱、双参数谱等数学模型。

当水面飞行器在波浪上运动时，作为运动系统的飞机可以看成平稳的线性系统，海浪的扰动可以看成是飞机运动系统的输入，飞机由此产生的俯仰、升沉运动可以视为是平稳的随机过程[11]。既然海浪可以看成不同波长、不同周期和相位随机的微幅单元波的叠加，那么飞机的运动可以看成是在这些单元波上运动响应的叠加。只要得到飞机在单元波上的传递函数，那么就可以结合海浪谱计算出飞机的运动谱，从而得到飞机的运动响应。

开展模型水池波浪试验是获得飞机运动传递函数的一种重要方法，为了确保通过有限的试验波长状态来模拟飞机在较大频率范围内传递函数的准确性，试验波长的选择范围要能充分表达传递函数的特征，一般情况下最大波长到飞机长度的 4 倍 ~5 倍时就能覆盖整个特征范围。

研究人员按照图 3 所示的试验方法开展了某大型水陆两栖飞机缩比模型水池试验，本次试验共进行了 5 个试验速度、6 个波长和 1 个波高，共 30 个状态点。其中试验速度换算至实机分别处在 45.5 ~ 136.6 km/h，波长处在 25 ~ 140 m（为船体长度的 0.7 倍 ~4.2 倍），波高为 1.5 m。通过试验，得到了试验模型在不同波高、不同波长、不同速度下的俯仰角、升沉响应特性。

根据试验结果，研究人员利用谱分析法和 ITTC 双参数谱得到的某大型水陆两栖飞机在有义浪高 $h_{1/3}=1.5$ m 海浪上运动过程中俯仰角和垂向升沉波动响应的统计值随速度变化曲线（见图 4、图 5），该参数谱表达式为

$$S_x(\omega) = \frac{A}{\omega^5}\exp\left(-\frac{B}{\omega^4}\right) \qquad (1)$$

式中：$A=173h_{1/3}^2/T_1^4$，$B=691/T_1^4$；T_1 是海浪的特征周期，且 $T_1=2\pi m_0/m_1$；m_0、m_1 分别是海浪谱对原点的零次矩和一次矩；ω 是遭遇频率。

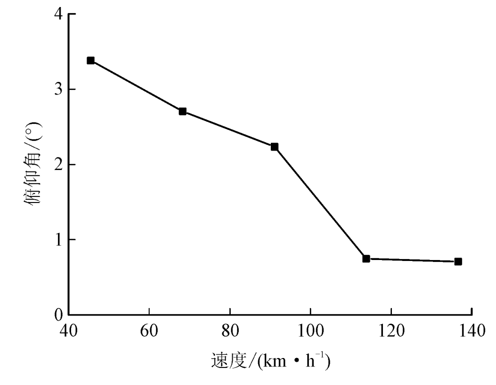


图 4　波浪中运动俯仰角波动曲线

Fig. 4　Predicted trim curve on rough water

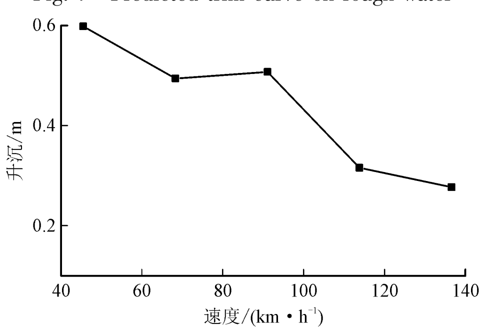


图 5　波浪中运动垂向升沉波动曲线

Fig. 5 Heaving curve on rough water

从图 4 ~5 中可以看出，飞机的俯仰角和升沉响应随速度增大呈现减小的趋势，在速度 70 km/h 以前，俯仰角和垂向升沉波动幅值分别在 3°、0.5 m 左右，速度在 70 ~ 110 km/h 范围内时迅速减小，速度在 110 ~140 km/h 范围内俯仰角和垂向升沉维持稳定，分别在 0.7°、0.3 m 左右。速度在 110 ~140 km/h 区间飞机的俯仰角和升沉波动预报结果与模型试验

过程中观察到的运动现象存在一定差异的，试验模型在该速度区间内俯仰角和升沉存在更剧烈的情况(相比于中低速)，这说明谱分析法有对应的适用速度范围。

图6所示为某大型水陆两栖飞机在静水中运动时的俯仰角和升沉随速度变化曲线。从图中可以看出，60～90 km/h 是飞机俯仰角和升沉迅速增大的速度区间，这是飞机受到的水动作用力迅速增大引起的，是飞机从排水航行到滑行阶段的过渡。飞机进入滑行状态后，不再满足“飞机在海浪上的运动是平稳随机过程”这一假设，因此利用谱分析法得到的结果与实际现象出现了偏离。当飞机运动速度低、波高较小时谱分析法是适用的，当飞机进入滑行状态后，俯仰运动和升沉运动约与波高的0.7次方～0.85次方成正比，属于弱非线型关系[12]。因此在开展模型水池试验时需要进行线性校核试验，即固定波长，变化一组波高进行试验，测得模型在波浪上的纵摇、升沉运动参数，得到各运动参数的线性波高范围，然后根据线性校核试验确定的波高开展试验，才能利用谱分析法对飞机的抗浪性进行分析。

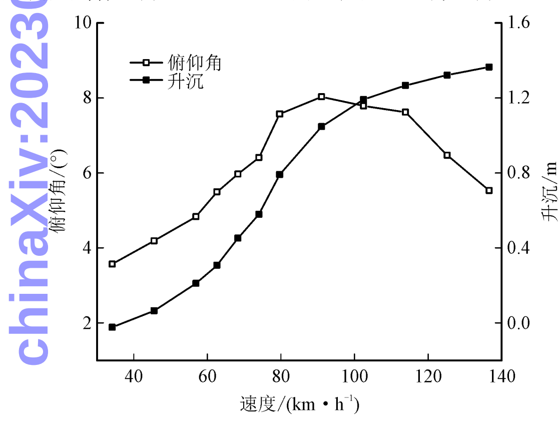


图6 静水中运动俯仰角和垂向升沉曲线

Fig. 6 Trim and heaving curve on calm water

3 基于线性缩比法的抗浪性分析

线性缩比法是研究人员在某大型水陆两栖飞机研制过程中摸索出来的一种评估方法[13]，该方法利用飞机需验证的技术指标，换算出对应的模型试验波高，再通过傅汝德数相似准则对应的换算关系，利用试验模型的俯仰角、垂向升沉、过载响应预报得到实机在抗浪指标条件下的俯仰角、垂向升沉和过载响应。

图7、图8所示分别为利用试验结果和线性缩比法得到的实机在波高1.5 m海浪上，不同速度、不同波长条件下俯仰角和垂向升沉的波动响应曲线[14]。可以看出，在短波中(波长25、35 m)飞机的俯仰角和垂向升沉波动稍小，在中长波中俯仰角和垂向升沉波动增大。对于俯仰角波动，速度100 km/h以下时俯仰角波动稍大，速度大于100 km/h时俯仰角波动偏小。对于垂向升沉波动，速度大于80 km/h、波长85、100、140 m状态下升沉波动偏大，而其他状态下速度对升沉波动响应影响较小。

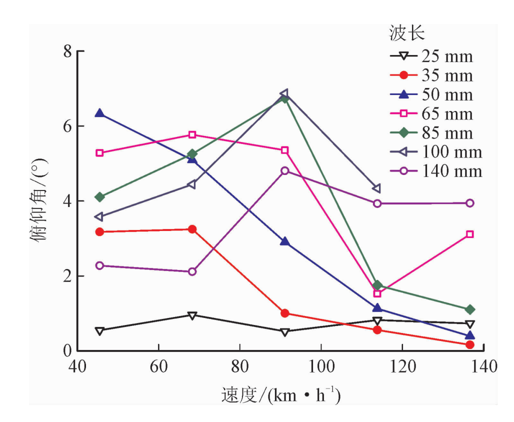


图7 俯仰角波动响应曲线

Fig. 7 Trim curve on rough water of different wave length

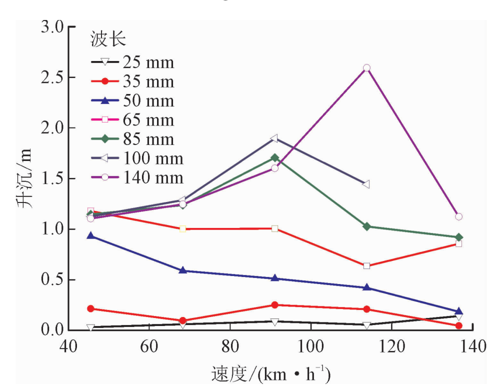


图8 垂向升沉波动响应曲线

Fig. 8 Heaving curve on rough water of different wave length

线性缩比法的优势是可以详细给出飞机在不同速度、不同波长下飞机的响应波动值，并可以分析出飞机俯仰角和升沉波动响应随速度和波长的变化规律。但该方法是研究人员在型号研制过程中利用缩比模型水池试验和有限的试飞总结分析出来的评估方法，可用于定性分析飞机的运动响应规律，定量分析结果还需进一步开展不同海浪条件下的试飞进行验证。

4 结 论

针对水面飞行器水池试验模型与实机之间气动

升力系数差异,研制了一套恒力装置,可将模型气动升力系数修正到与实机一致的状态。在此基础上,开展了某水陆两栖飞机缩比模型水池波浪试验,系统的对比了两种抗浪性分析方法,结果表明。

1)谱分析法仅在中低速(对某大型水陆两栖飞机为 90 km/h 以下)时用来对飞机的运动进行预报。该方法可以结合海况等级,给出飞机运动响应的统计结果。

2)线性缩比法是研究人员在某大型水陆两栖飞机研制过程中,结合模型水池拖曳试验和试飞总结出来飞机抗浪性评估方法,这种方法适用于飞机从低速到离水起飞整个速度范围,可以定性给出飞机俯仰角、飞高波动随速度、波长的变化规律。

3)利用线性缩比法得到的飞机在波浪中运动响应定量结果的准确性,还有待实机在海浪环境下的试飞结果进行验证。

参考文献:

[1] 黄淼,褚林塘,李成华,等. 大型水陆两栖飞机抗浪能力研究[J]. 航空学报,2019,40(1):116-124.
HUANG Miao, CHU Lintang, LI Chenghua, et al. Seakeeping performance research of large amphibious aircraft[J]. Acta aeronautica et astronautica Sinica, 2019, 40(1):116-124(in Chinese).

[2] 熊文海,毛筱菲,李毓江. 船舶耐波性衡准及其评价方法浅析[J]. 船海工程,2007,36(4):42-45.
XIONG Wenhai, MAO Xiaofei, LI Yujiang. Review on evaluation methods and criteria for sea-keeping of ships[J]. Ship & ocean engineering, 2007, 36(4):42-45(in Chinese).

[3] 孙丰,王明振,褚林塘,等. 大型水陆两栖飞机波浪水面着水分析方法[J]. 航空计算技术,2019,49(4):35-38.
SUN Feng, WANG Mingzhen, CHU Lintang, et al. Analysis method of large-scale amphibious aircraft landing on waves[J]. Aeronautical computing technique, 2019, 49(4):35-38(in Chinese).

[4] 黄淼,廉滋鼎,左仔滨,等. 水陆两栖飞机模型水池波浪试验研究[J]. 航空科学技术,2016,27(1):74-78.
HUANG Miao, LIAN Ziding, ZUO Zaibin, et al. Study of scaled model tank tests in waves of an amphibian[J]. Aeronautical science & technology, 2016, 27(1):74-78(in Chinese).

[5] HU Q, WANG M Z, WU B, et al. The application of overset grid in the analysis of impact loads of amphibious aircraft during landing on the water[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol, United Kingdom: IOP Publishing, 2020: 012032.

[6] 黄淼,吴彬,蒋荣,等. 水上飞机在波浪上运动响应特性试验研究[J]. 实验流体力学,2015,29(3):41-46.
HUANG Miao, WU Bin, JIANG Rong, et al. Experimental study on motion response of a seaplane on waves[J]. Journal of experiments in fluid mechanics, 2015, 29(3):41-46(in Chinese).

[7] 张培红,周乃春,邓有奇,等. 雷诺数对飞机气动特性的影响研究[J]. 空气动力学学报,2012,30(6):693-698.
ZHANG Peihong, ZHOU Naichun, DENG Youqi, et al. The effects of Reynolds number on airplane aerodynamic characteristics[J]. Acta aerodynamica Sinica, 2012, 30(6):693-698(in Chinese).

[8] 黄淼. 基于气动力修正的模型水池试验技术研究报告: YK1316-SDJB-001[R]. 荆门:中国特种飞行器研究所,2018.

[9] 中国特种飞行器研究所. 一种水面飞行器耐波性试验恒力卸载装置和方法:CN201911282793. X[P]. 2020-04-24.

[10] 吴秀恒. 船舶操纵性与耐波性[M]. 2 版. 北京:人民交通出版社,1999:147-190.

[11] 褚林塘. 水上飞机水动力设计[M]. 北京:航空工业出版社,2014:123-126.

[12] 董祖舜. 快艇动力学[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1991.

[13] 史圣哲. 抗浪能力试验技术研究报告:ZK1302-SDJB-005[R]. 荆门:中国特种飞行器研究所,2018.

[14] 高现娇. 大型灭火/水上救援水陆两栖飞机抗浪性分析:SYD0033K100C1[R]. 荆门:中国特种飞行器研究所,2020.

(编辑　黄崇亚　李坤璐)